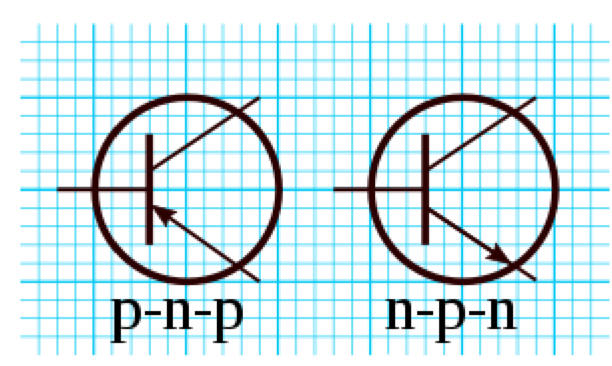
Биполярный транзистор

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Биполя́рный транзи́стор — трёхэлектродный полупроводниковый прибор, один из типов транзисторов. В полупроводниковой структуре сформированы два p-n-перехода, перенос заряда через которые осуществляется носителями двух полярностей — электронами и дырками. Именно поэтому прибор получил название «биполярный» (от англ. *bipolar*), в отличие от полевого (униполярного) транзистора.

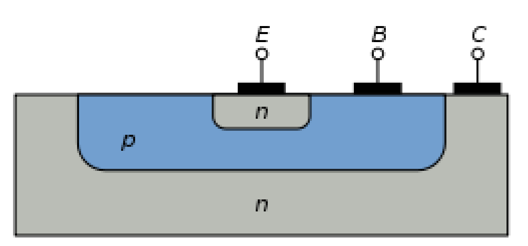


Обозначение биполярных транзисторов на схемах по ГОСТ 2.730[1]. Направление стрелки показывает направление тока через эмиттерный переход в активном режиме и служит для указания *n-p-n* и *p-n-p*транзисторов. Окружности символизирует транзистор в индивидуальном корпусе, отсутствие — транзистор в составе микросхемы.

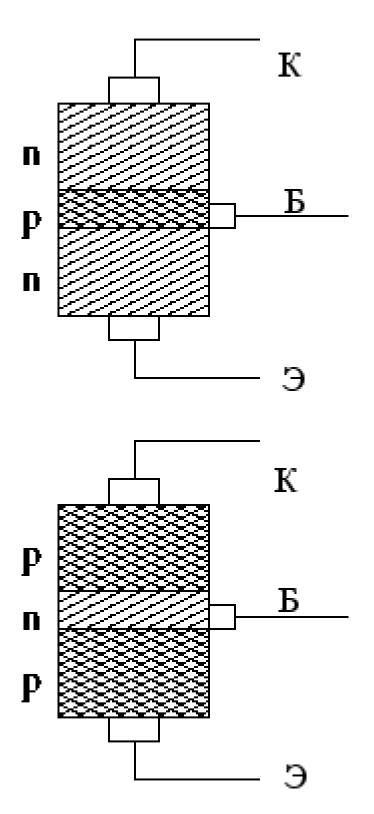
Применяется в электронных устройствах для усиления или генерации электрических колебаний, а также в качестве коммутирующего элемента (например, в схемах ТТЛ).

Содержание

Устройство



Упрощённая схема поперечного разреза планарного биполярного n-p-n транзистора.



Простейшая наглядная схема устройства транзистора

Биполярный транзистор состоит из трёх полупроводниковых слоёв с чередующимся типом примесной проводимости: эмиттера (обозначается «Э», англ. *E*), базы («Б», англ. *B*) и коллектора («К», англ. *C*). В зависимости от порядка чередования слоёв различают *n-p-n* (эмиттер — *n*-полупроводник, база — *p*-полупроводник, коллектор — *n*-полупроводник) и *p-n-p* транзисторы. К каждому из слоёв подключены проводящие невыпрямляющие контакты[2].

С точки зрения типов проводимостей эмиттерный и коллекторный слои не различимы, но при изготовлении они существенно различаются степенью легирования для улучшения электрических параметров прибора. Коллекторный слой легируется слабо, что повышает допустимое коллекторное напряжение. Эмиттерный слой — сильно легированный: величина пробойного обратного напряжения эмиттерного перехода не критична, так как обычно в электронных схемах транзисторы работают с прямосмещённым эмиттерным переходом. Кроме того, сильное легирование эмиттерного слоя обеспечивает лучшую инжекцию неосновных носителей в базовый слой, что увеличивает коэффициент передачи по току в схемах с общей базой. Слой базы легируется слабо, так как располагается между эмиттерным и коллекторным слоями и должен иметь большое электрическое сопротивление.

Общая площадь перехода база-эмиттер выполняется значительно меньше площади перехода коллектор-база, что увеличивает вероятность захвата неосновных носителей из базового слоя и улучшает коэффициент передачи. Так как в рабочем режиме переход коллектор-база обычно включён с обратным смещением, в нём выделяется основная доля тепла, рассеиваемого прибором, и повышение его площади способствует лучшему охлаждению кристалла. Поэтому на практике биполярный транзистор общего применения является несимметричным устройством (то есть инверсное включение, когда меняют местами эмиттер и коллектор, нецелесообразно).

Для повышения частотных параметров (быстродействия) толщину базового слоя делают меньше, так как этим, в том числе, определяется время «пролёта» (диффузии в бездрейфовых приборах) неосновных носителей. Но при снижении толщины базы снижается предельное коллекторное напряжение, поэтому толщину базового слоя выбирают исходя из разумного компромисса.

В первых транзисторах в качестве полупроводникового материала использовался металлический германий. Полупроводниковые приборы на его основе имеют ряд недостатков, и в настоящее время (2015 г.) биполярные транзисторы изготавливают в основном из монокристаллического кремния и монокристаллического арсенида галлия. Благодаря очень высокой подвижности носителей в арсениде галлия приборы на его основе обладают высоким быстродействием и используются в сверхбыстродействующих логических схемах и в схемах СВЧ-усилителей.

Принцип работы

В активном усилительном режиме работы транзистор включён так, что его эмиттерный переход смещён в прямом направлении[3] (открыт), а коллекторный переход смещён в обратном направлении (закрыт).

В транзисторе типа **n-p-n**[4] основные носители заряда в эмиттере (электроны) проходят через открытый переход эмиттер-база (инжектируются) в область базы. Часть этих электронов рекомбинирует с основными носителями заряда в базе (дырками). Однако, из-за того, что базу делают очень тонкой и сравнительно слабо легированной, бо́льшая часть электронов, инжектированных из эмиттера, диффундирует в область коллектора, так как время рекомбинации относительно велико[5]. Сильное электрическое поле обратносмещённого коллекторного перехода захватывает неосновные носители из базы (электроны) и переносит их в коллекторный слой. Ток коллектора, таким образом, практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери на рекомбинацию в базе, которая и образует ток базы ($I_э = I_б + I_к$).

Коэффициент α, связывающий ток эмиттера и ток коллектора ($I_к = \alpha\ I_э$), называется **коэффициентом передачи тока эмиттера**. Численное значение коэффициента α = 0,9—0,999. Чем больше коэффициент, тем эффективней транзистор передаёт ток. Этот коэффициент мало зависит от напряжения коллектор-база и база-эмиттер. Поэтому в широком диапазоне рабочих напряжений ток коллектора пропорционален току базы, коэффициент пропорциональности равен β = α/(1 − α), от 10 до 1000. Таким образом, малый ток базы управляет значительно бо́льшим током коллектора.

Режимы работы

Напряжения на эмиттере, базе, коллекторе (U_E, U_B, U_C)	Смещение перехода база-эмиттер для типа n-p-n	Смещение перехода база-коллектор для типа n-p-n	Режим для типа n-p-n
$U_E < U_B < U_C$	прямое	обратное	нормальный активный режим
$U_E < U_B > U_C$	прямое	прямое	режим насыщения
$U_E > U_B < U_C$	обратное	обратное	режим отсечки
$U_E > U_B > U_C$	обратное	прямое	инверсный активный режим
Напряжения на эмиттере, базе, коллекторе (U_E, U_B, U_C)	**Смещение перехода база-эмиттер для типа p-n-p**	**Смещение перехода база-коллектор для типа p-n-p**	**Режим для типа p-n-p**
$U_E < U_B < U_C$	обратное	прямое	инверсный активный режим
$U_E < U_B > U_C$	обратное	обратное	режим отсечки
$U_E > U_B < U_C$	прямое	прямое	режим насыщения
$U_E > U_B > U_C$	прямое	обратное	нормальный активный режим

Нормальный активный режим

Переход эмиттер-база включён в прямом направлении[3] (открыт), а переход коллектор-база — в обратном (закрыт):

> $U_{ЭБ}<0$; $U_{КБ}>0$ (для транзистора *n-p-n* типа), для транзистора *p-n-p*типа условие будет иметь вид $U_{ЭБ}>0$; $U_{КБ}<0$.

Инверсный активный режим

Эмиттерный переход имеет обратное смещение, а коллекторный переход — прямое: $U_{КБ}<0$; $U_{ЭБ}>0$ (для транзистора *n-p-n* типа).

Режим насыщения

Оба *p-n* перехода смещены в прямом направлении (оба открыты). Если эмиттерный и коллекторный *p-n*-переходы подключить к внешним источникам в прямом направлении, транзистор будет находиться в режиме насыщения. Диффузионное электрическое поле эмиттерного и коллекторного переходов будет частично ослабляться электрическим полем, создаваемым внешними источниками *Uэб* и *Uкб*. В результате уменьшится потенциальный барьер, ограничивавший диффузию основных носителей заряда, и начнётся проникновение (инжекция) дырок из эмиттера и коллектора в базу, то есть через эмиттер и коллектор транзистора потекут токи, называемые токами насыщения эмиттера ($I_{\text{Э. нас}}$) и коллектора ($I_{\text{К. нас}}$).

Напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($U_{\text{КЭ. нас}}$) — это падение напряжения на открытом транзисторе (смысловой аналог $\mathbf{R_{\text{СИ. отк}}}$ у полевых транзисторов). Аналогично **напряжение насыщения база-эмиттер** ($U_{\text{БЭ. нас}}$) — это падение напряжения между базой и эмиттером на открытом транзисторе.

Режим отсечки

В данном режиме коллекторный *p-n* переход смещён в обратном направлении, а на эмиттерный переход может быть подано как обратное, так и прямое смещение, не превышающее порогового значения, при котором начинается эмиссия неосновных носителей заряда в область базы из эмиттера (для кремниевых транзисторов приблизительно 0,6—0,7 В).

Режим отсечки соответствует условию $U_{\text{ЭБ}}$<0,6—0,7 В, или $I_{\text{Б}}=0$[6][7].

Барьерный режим

В данном режиме **база** транзистора по постоянному току соединена накоротко или через небольшой резистор с его **коллектором**, а в **коллекторную** или в **эмиттерную** цепь транзистора включается резистор, задающий ток через транзистор. В таком включении транзистор представляет собой своеобразный диод, включённый последовательно с токозадающим резистором. Подобные схемы каскадов отличаются малым количеством комплектующих, хорошей развязкой по высокой частоте, большим рабочим диапазоном температур, нечувствительностью к параметрам транзисторов.

Схемы включения

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями:

- Коэффициент усиления по току $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$.
- Входное сопротивление $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$.

Схема включения с общей базой

- Среди всех трёх конфигураций обладает наименьшим входным и наибольшим выходным сопротивлением. Имеет коэффициент усиления по току, близкий к единице, и большой коэффициент усиления по напряжению. Не инвертирует фазу сигнала.
- Коэффициент усиления по току: $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_{\text{к}}/I_{\text{э}} = \alpha$ [α<1].

- Входное сопротивление $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх} = U_{эб}/I_{э}$.

Входное сопротивление (входной импеданс) усилительного каскада с общей базой мало зависит от тока эмиттера, при увеличении тока — снижается и не превышает единиц — сотен Ом для маломощных каскадов, так как входная цепь каскада при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Схема включения с общей базой.

Достоинства

- Хорошие температурные и широкий частотный диапазон, так как в этой схеме подавлен эффект Миллера.
- Высокое допустимое коллекторное напряжение.

Недостатки

- Малое усиление по току, равное α, так как α всегда немного менее 1
- Малое входное сопротивление

Схема включения с общим эмиттером

- Коэффициент усиления по току: $I_{вых}/I_{вх} = I_{к}/I_{б} = I_{к}/(I_{э}\text{-}I_{к}) = \alpha/(1\text{-}\alpha) = \beta$ [β>>1].
- Входное сопротивление: $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх} = U_{бэ}/I_{б}$.

Схема включения с общим эмиттером.
$I_{вых} = I_{к}$
$I_{вх} = I_{б}$
$U_{вх} = U_{бэ}$
$U_{вых} = U_{кэ}$.

Достоинства

- Большой коэффициент усиления по току.
- Большой коэффициент усиления по напряжению.
- Наибольшее усиление мощности.
- Можно обойтись одним источником питания.
- Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

Недостатки

- Имеет меньшую температурную стабильность. Частотные свойства такого включения по сравнению со схемой с общей базой существенно хуже, что обусловлено эффектом Миллера.

Схема с общим коллектором

- Коэффициент усиления по току: $I_{вых}/I_{вх} = I_{э}/I_{б} = I_{э}/(I_{э}\text{-}I_{к}) = 1/(1\text{-}\alpha) = \beta+1$ [β>>1].
- Входное сопротивление: $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх} = (U_{бэ} + U_{кэ})/I_{б}$.

Достоинства

- Большое входное сопротивление.
- Малое выходное сопротивление.

Недостатки

- Коэффициент усиления по напряжению немного меньше 1.

Схему с таким включением часто называют «*эмиттерным повторителем*».

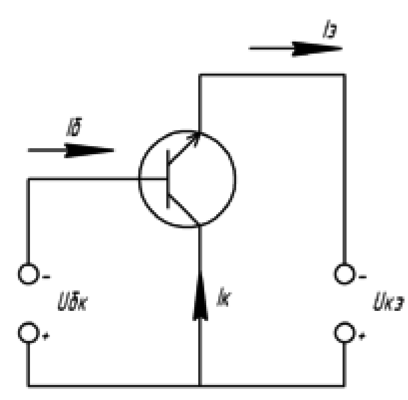


Схема включения с общим коллектором.
$I_{вых} = I_э$
$I_{вх} = I_б$
$U_{вх} = U_{бк}$
$U_{вых} = U_{кэ}$.

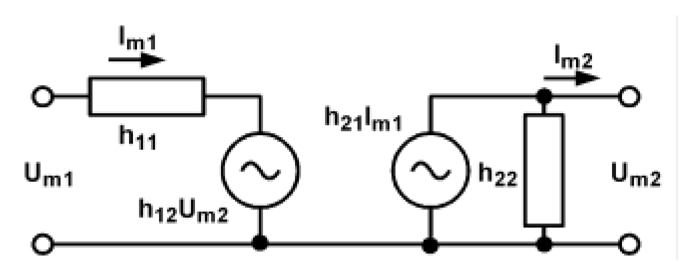
Основные параметры

- Коэффициент передачи по току.
- Входное сопротивление.
- Выходная проводимость.
- Обратный ток коллектор-эмиттер.
- Время включения.
- Предельная частота коэффициента передачи тока базы.
- Обратный ток коллектора.
- Максимально допустимый ток.
- Граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером.

Параметры транзистора делятся на собственные (первичные) и вторичные. Собственные параметры характеризуют свойства транзистора, независимо от схемы его включения. В качестве основных собственных параметров принимают:

- коэффициент усиления по току α;
- сопротивления эмиттера, коллектора и базы переменному току $r_э$, $r_к$, $r_б$, которые представляют собой:
  - $r_э$ — сумму сопротивлений эмиттерной области и эмиттерного перехода;
  - $r_к$ — сумму сопротивлений коллекторной области и коллекторного перехода;
  - $r_б$ — поперечное сопротивление базы.

Вторичные параметры различны для различных схем включения транзистора и, вследствие его нелинейности, справедливы только для низких частот и малых амплитуд сигналов. Для вторичных параметров предложено несколько систем параметров и соответствующих им эквивалентных схем. Основными считаются смешанные (гибридные) параметры, обозначаемые буквой «*h*».



Эквивалентная схема биполярного транзистора с использованием *h*-параметров.

Входное сопротивление — сопротивление транзистора входному переменному току при коротком замыкании на выходе. Изменение входного тока является результатом изменения входного напряжения, без влияния обратной связи от выходного напряжения.

$h_{11} = U_{m1}/I_{m1}$, при $U_{m2} = 0$.

Коэффициент обратной связи по напряжению показывает, какая доля выходного переменного напряжения передаётся на вход транзистора вследствие обратной связи в нём. Во входной цепи транзистора нет переменного тока, и изменение напряжения на входе происходит только в результате изменения выходного напряжения.

$h_{12} = U_{m1}/U_{m2}$, при $I_{m1} = 0$.

Коэффициент передачи тока (коэффициент усиления по току) показывает усиление переменного тока при нулевом сопротивлении нагрузки. Выходной ток зависит только от входного тока без влияния выходного напряжения.

$h_{21} = I_{m2}/I_{m1}$, при $U_{m2} = 0$.

Выходная проводимость — внутренняя проводимость для переменного тока между выходными зажимами. Выходной ток изменяется под влиянием выходного напряжения.

$h_{22} = I_{m2}/U_{m2}$, при $I_{m1} = 0$.

Зависимость между переменными токами и напряжениями транзистора выражается уравнениями:

$U_{m1} = h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2}$;
$I_{m2} = h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2}$.

В зависимости от схемы включения транзистора к цифровым индексам h-параметров добавляются буквы: «э» — для схемы ОЭ, «б» — для схемы ОБ, «к» — для схемы ОК.

Для схемы ОЭ: $I_{m1} = I_{mб}$, $I_{m2} = I_{mк}$, $U_{m1} = U_{mб\text{-}э}$, $U_{m2} = U_{mк\text{-}э}$. Например, для данной схемы:

$h_{21э} = I_{mк}/I_{mб} = β$.

Для схемы ОБ: $I_{m1} = I_{mэ}$, $I_{m2} = I_{mк}$, $U_{m1} = U_{mэ\text{-}б}$, $U_{m2} = U_{mк\text{-}б}$.

Собственные параметры транзистора связаны с h-параметрами, например для схемы ОЭ:

$$h_{11э} = r_\delta + \frac{r_э}{1-\alpha};$$

$$h_{12э} \approx \frac{r_э}{r_к(1-\alpha)};$$

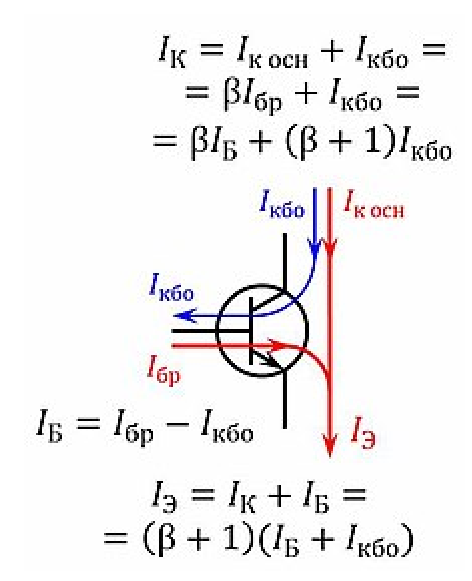
$$h_{21э} = \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha};$$

$$h_{22э} \approx \frac{1}{r_к(1-\alpha)}.$$

С повышением частоты заметное влияние на работу транзистора начинает оказывать ёмкость коллекторного перехода $C_к$. Его реактивное сопротивление уменьшается, шунтируя нагрузку и, следовательно, уменьшая коэффициенты усиления α и β. Сопротивление эмиттерного перехода $C_э$ также снижается, однако он шунтируется малым сопротивлением перехода $r_э$ и в большинстве случаев может не учитываться. Кроме того, при повышении частоты происходит дополнительное снижение коэффициента β в результате отставания фазы тока коллектора от фазы тока эмиттера, которое вызвано инерционностью процесса перемещения носителей через базу от эммитерного перехода к коллекторному и инерционностью процессов накопления и рассасывания заряда в базе. Частоты, на которых происходит снижение коэффициентов α и β на 3 дБ, называются **граничными частотами коэффициента передачи тока** для схем ОБ и ОЭ соответственно.

В импульсном режиме ток коллектора изменяется с запаздыванием на время задержки $\tau_з$ относительно импульса входного тока, что вызвано конечным временем пробега носителей через базу. По мере накопления носителей в базе ток коллектора нарастает в течение длительности фронта $\tau_ф$. **Временем включения** транзистора называется $\tau_{вкл} = \tau_з + \tau_ф$.

Токи в транзисторе



Токи в биполярном транзисторе

Токи в биполярном транзисторе имеют две основных составляющих.

- Ток основных носителей эмиттера $I_Э$, который частично проходит в коллектор, образуя ток основных носителей коллектора $I_{к\ осн}$, частично рекомбинирует с основными носителями базы, образуя рекомбинантный ток базы $I_{бр}$.
- Ток неосновных носителей коллектора, который течёт через обратно смещённый коллекторый переход, образуя обратный ток коллектора $I_{кбо}$.

Биполярный СВЧ-транзистор

Биполярные СВЧ-транзисторы (БТ СВЧ) служат для усиления колебаний с частотой свыше 0,3 ГГЦ[8]. Верхняя граница частот БТ СВЧ с выходной мощностью более 1 Вт составляет около 10 ГГц. Большинство мощных БТ СВЧ по структуре относится к n-p-n типу[9]. По методу формирования переходов БТ СВЧ являются эпитаксиально-планарными. Все БТ СВЧ, кроме самых маломощных, имеют многоэмиттерную структуру (гребёнчатую, сетчатую)[10]. По мощности БТ СВЧ разделяются на маломощные (рассеиваемая мощность до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 до 1,5 Вт) и мощные (свыше 1,5 Вт)[11]. Выпускается большое число узкоспециализированных типов БТ СВЧ[11].